

**УДК 621.319.53**

**РАЗРЯД ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ  
НА R/RC НАГРУЗКУ**

**Петков А.А., Винников Д.В.**

*(г. Харьков, Украина)*

*This paper describes the discharge of high voltage pulsed test facilities created on the basis of the energy capacitors onto R/RC load. The relationships which allows for the analysis and synthesis of the discharge circuit have been given.*

Емкостные накопители энергии (ЕНЭ) широко используются в различных высоковольтных импульсных испытательных устройствах (ВИИУ). В частности, на их базе создаются генераторы импульсов напряжения (ГИН) и тока (ГИТ). Реальные электрические схемы разрядных цепей ГИТ и ГИН имеют существенные различия, однако для целей анализа тока, протекающего в нагрузке (напряжения на нагрузке), используют упрощенные схемы, которые эквивалентны реальным по ряду параметров, существенных для анализа протекающих процессов, например, по величине емкости, индуктивности и активного сопротивления ЕНЭ в процессе разряда. В ряде случаев, не зависимо от типа ВИИУ, эквивалентные схемы имеют один и тот же вид [1, 2].

Основной задачей, возникающей на стадии проектирования ВИИУ, является синтез разрядной цепи. Несмотря на обширный объем литературы по данному вопросу, многообразие испытываемых объектов и испытательных импульсов диктует необходимость постоянного совершенствования методик выбора величин параметров элементов разрядных цепей.

В настоящей работе рассмотрена методика выбора величины параметров элементов цепи разряда ЕНЭ на R/RC нагрузку при задании импульса тока (напряжения) экспоненциальным полиномом (символом R/RC обозначены параллельно соединенные две ветви, одна из которых содержит R - резистивный элемент, вторая – последовательно соединенные R - резистивный и C – емкостной элементы). Эквивалентная схема ЕНЭ в режиме разряда приведена на рис. 1.

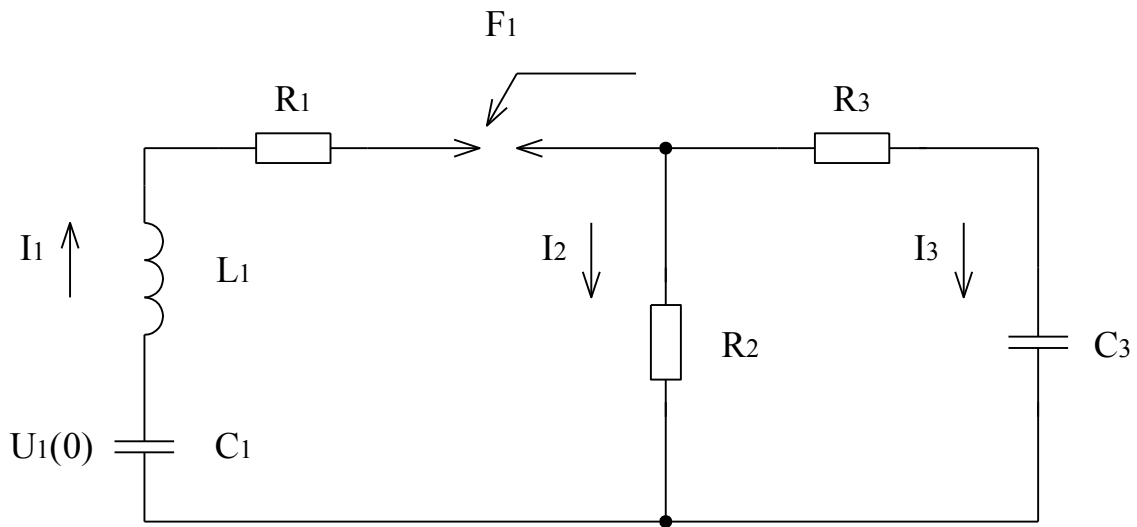


Рис. 1. Эквивалентная схема цепи разряда ЕНЭ.

$U_1(0)$  – напряжение ЕНЭ;  $C_1$  – емкость ЕНЭ;  $R_1$  – эквивалентное сопротивление цепи разряда конденсаторов ЕНЭ;  $L_1$  – эквивалентная индуктивность цепи разряда конденсаторов ЕНЭ;  $F_1$  – коммутатор;  $R_2, R_3$  – сопротивление элементов нагрузки;  $C_3$  – емкость нагрузки.

Анализ показывает, что в такой схеме операторные токи в ветвях и напряжение на  $C_3$  имеют вид:

$$I_k(p) = Q_k(p)/N(p), \quad k = 1 \dots 3, \quad (1)$$

$$U_{C3}(p) = A_0/N(p), \quad (2)$$

где  $I_k(p)$  – операторное изображение тока в  $k$  – ой ветви;

$U_{C3}(p)$  - операторное изображение напряжения на емкости  $C_3$ ;

$$Q_k(p) = pQ_{k1} + Q_{k0};$$

$$Q_{11} = U_1(0)(R_2 + R_3); \quad Q_{10} = U_1(0)/C_3;$$

$$Q_{21} = U_1(0)R_3; \quad Q_{20} = U_1(0)/C_3;$$

$$Q_{31} = U_1(0)R_2; \quad Q_{30} = 0;$$

$$A_0 = U_1(0)R_2/C_3;$$

$$N(p) = p^3B_3 + p^2B_2 + pB_1 + B_0; \quad (3)$$

$$B_3 = L_1(R_2 + R_3); \quad B_2 = L_1/C_3 + R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3;$$

$$B_1 = (R_2 + R_3)/C_1 + (R_1 + R_2)/C_3; \quad B_0 = 1/(C_1C_3).$$

С помощью выражений (1) и (2) могут быть определены токи, протекающие в элементах разрядной цепи (напряжения на элементах). Их характер определяется соотношением величин элементов. В дальнейшем

примем, что все корни знаменателя в выражениях (1) и (2) действительные и, следовательно, временная зависимость импульсов, описывающих (1) и (2) представима выражением

$$f(t) = M \sum_{k=1}^3 a_k e^{-b_k t} \quad (4)$$

где  $f(t)$  - текущее значение тока (напряжения);  
 $M$  – максимальное значение тока (напряжения) в импульсе;  
 $a_1 + a_2 + a_3 = 0$  – условие отсутствия тока (напряжения) при  $t = 0$ ;  
 $\sum_{k=1}^3 a_k e^{-b_k t_{\max}} = 1$  - условие нормировки;  
 $t_{\max}$  - время достижения максимального значения напряжения в импульсе;  
 $b_k > 0$ .

Можно показать, что операторное изображение (4) имеет вид

$$f(p) = (pD_1 + D_0) / (p^3 + p^2V_2 + pV_1 + V_0), \quad (5)$$

где  $D_1 = a_1(b_2 + b_3) + a_2(b_1 + b_3) + a_3(b_1 + b_2)$ ;  $D_0 = a_1b_2b_3 + a_2b_1b_3 + a_3b_1b_2$ ;  
 $V_2 = b_1 + b_2 + b_3$ ;  $V_1 = b_1b_2 + b_1b_3 + b_2b_3$ ;  $V_0 = b_1b_2b_3$ .

Если параметры  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $M$  в выражении (4) известны, то приравнявая коэффициенты операторных изображений при одинаковых степенях в выражениях (1), (2) и (5), получим систему уравнений для выбора величин параметров элементов разрядной цепи

$$\begin{aligned} B_3 &= 1; B_2 = V_2; B_1 = V_1; B_0 = V_0; \\ Q_{21} &= D_1M; Q_{20} = D_0M - \text{для тока } I_2; \\ D_1 &= 0; A_0 = D_0M - \text{для напряжения } U_{C3} \end{aligned} \quad (6)$$

Для корректного применения процедуры выбора, система уравнений (6) должна быть дополнена условиями физической реализуемости элементов

$$ВП_{\text{Н}} \leq ВП \leq ВП_{\text{В}} \quad (7)$$

где  $ВП$  – вычисленная величина параметра;  $ВП_{\text{Н}}$  – нижнее допускаемое значение величины параметра;  $ВП_{\text{В}}$  - верхнее допускаемое значение величины параметра.

При выборе целесообразно потребовать минимальность запасаемой энергии

$$\min (W = C_1 U_1(0)^2/2) \quad (8)$$

Если параметры выбираются для апериодического импульса тока (напряжения), который на практике обычно идентифицируется длительностью импульса -  $t_{\text{и}}$  и длительностью фронта -  $t_{\text{ф}}$ , например, [1], то в условия задачи выбора (6) – (8) дополнительно вводятся следующие соотношения

$$t_{\text{и}} - t_{\text{и}}^*(a_k, b_k) = 0, \quad t_{\text{ф}} - t_{\text{ф}}^*(a_k, b_k) = 0 \quad (9)$$

где  $t_{\text{и}}^*(a_k, b_k)$ ,  $t_{\text{ф}}^*(a_k, b_k)$  – операторы, вычисляющие соответственно  $t_{\text{и}}$  и  $t_{\text{ф}}$ , по известным  $a_k$  и  $b_k$ ;

а также следующие ограничения

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^3 a_k e^{-b_k t} &\geq 0 - \text{условие положительности импульса;} \\ \sum_{k=1}^3 a_k e^{-b_k t_{\text{max}}} &= 1 - \text{условие нормировки;} \quad \sum_{i=1}^3 a_i = 0; \\ b_1 &> b_2 > b_3 > 0; \end{aligned}$$

Поставленная задача является задачей нелинейного программирования и может быть решена соответствующими методами [3]. Достаточно просто она решается с использованием средств среды электронных таблиц Excel [4].

Таким образом, материалы, приведенные в работе, позволяют производить анализ и синтез разрядных схем ВИИУ, цепь разряда которых представима эквивалентной схемой рис. 1.

### Литература

1. Смирнов С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240 с.
2. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
3. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсел К. Оптимизация в технике: Кн. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 350 с.
4. Коттингхэм М. Excel 2000: руководство разработчика: Пер. с англ. – Издательская группа BHV, 2000. – 704 с.